2024 年 明新學報 47 卷 e024001
e024001 Vol. 47, 2024
Journal of Minghsin University of Science and Technology

Bluetooth Mesh 智慧型災害應變輔助廣播系統之開發及設定

彭亦暄[1] 田振岡[2] 李佩君[3*]

1：中華民國，新竹縣新豐鄉，明新學校財團法人明新科技大學，多媒體與遊戲發展系

2：中華民國，桃園市中壢區，國立中央大學，通訊工程系

3：中華民國，新竹縣新豐鄉，明新學校財團法人明新科技大學，資訊管理系

摘要

本實務應用型研究運用多種物聯網暨網際網路技術建構一「基於 Bluetooth mesh 及物聯網技術之災害應變輔助廣播系統」的系統雛型(prototype)，整體系統由三個子系統所組成：火災偵測子系統、中控子系統及廣播子系統，並由這三個子系統綜合提供四項主要功能：平時廣播、火災偵測、逃生路徑動態演算及適地性(location-based)語音輔助逃生指引等。本研究經測試驗證了系統設計確實可行，而依此設計所開發的系統雛型亦能正確運作。本論文呈現出系統設計與雛型實作，並針對系統所採用之 Bluetooth mesh 的前置設定有詳盡的說明。整體而言，本研究所開發的系統具備兩項主要特色：(1).以上層標準較統一且可直接用智慧型手機設定的 Bluetooth mesh 取代 ZigBee 組建火災偵測子系統內的無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)；(2). 火災偵測子系統所傳達的火災信號包含節點識別碼，中控子系統會據此使用演算法因應火災實際起始點及發展趨勢來動態地計算不同地點的逃生方向，並透過廣播子系統提供適地性語音廣播來輔助煙霧瀰漫、視線極差之火場各地點的逃生，作為靜態、視覺性逃生指引設施的輔助，應能更有效地提升逃生成功的機率。本研究希望能透過此系統為合作企業的產品增添附加價值，進而對合作企業拓展商機有所助益，並且在災害應變面向對社稷有所貢獻。

關鍵字：藍牙網狀網路、災害應變、物聯網、網際網路喇叭、適地性服務、乙太網路供電、廣播、無線感測網路

投稿日期:2023.12.30
修改日期:2024.01.26
接受日期:2024.04.08
刊登日期:2024.04.10

* 通訊作者：李佩君（助理教授） 地址：新竹縣新豐鄉新興路 1 號 Tel：(03)5593142 轉 3457 E-mail：pjlee@must.edu.tw／peichun.lee@gmail.com

2024 年 明新學報 47 卷 e024001
e024001 Vol. 47, 2024
Journal of Minghsin University of Science and Technology

Development and configuration of a Bluetooth mesh based assistant emergency evacuation public address system

I-Hsuan Peng[1] Chen-Kang Tien[2] Pei-Chun Lee[3*]

1：Dept. Multimedia and Game Development, Minghsin University of Science and Technology, Xinfeng, Hsinchu, Taiwan

2：Dept. Communication Engineering, National Central University, Zhongli, Taoyuan, Taiwan

3：Dept. Information Management, Minghsin University of Science and Technology, Xinfeng, Hsinchu, Taiwan

Abstract

This practical research utilized technologies of the Internet of Things (IoT) to develop a Bluetooth mesh and IoT-based assistant emergency evacuation public address (PA) system, which provides four functionalities: public address, fire detection, dynamic evacuation route planning, and location-based vocal evacuation guidance. System experimental results confirmed that the system design is feasible, and the prototype of the proposed system operates correctly. This paper presents the system design and prototype implementation, along with an elaboration of the pre-configuration of the Bluetooth mesh used in this system. Overall, the system developed in this research has two main features: (1). replacing ZigBee with Bluetooth mesh for constructing the wireless sensor network (WSN) inside the system, and (2). incorporating a dynamic route planning algorithm to dynamically calculate evacuation routes according to the received knowledge of the origin of the fire as well as the fire development when receiving fire signals, while also introducing location-based vocal evacuation guidance. As an assisting supplement to static, visual evacuation instruction banners, this approach is expected to help provide more pertinent escape routes according to the location and development of fire as well as offer location-based vocal evacuation guidance in a smoky and poorly visible fire scene, thereby increasing the chances of successful evacuation. The objective of this research is to add value to the IP speaker product of the collaborating company through this system, thereby benefiting their business opportunities, and making contributions to disaster response and mitigation efforts.

Keywords: Bluetooth mesh, emergency evacuation, Internet of Things (IoT), IP speakers, Location-based Services (LBS), Power over Ethernet (PoE), public address (PA), wireless sensor networks (WSNs)

Received：30 Dec 2023
Revised：26 Jan 2024
Accepted：08 Apr 2024
Published：10 Apr 2024

* 通訊作者：李佩君（助理教授） 地址：新竹縣新豐鄉新興路 1 號 Tel：(03)5593142 轉 3457
E-mail：pjlee@must.edu.tw／peichun.lee@gmail.com

一、前言

本實務應用型研究的主旨緊扣於台灣政府於民國 105 年至 112 年推動的「亞洲・矽谷」方案（中華民國行政院，民 105；中華民國國家發展委員會，無日期），回溯至民國 105 年，總統就職演說中即提到「以『創新、就業、分配』為核心價值，追求永續發展的經濟新模式」的政策，包含三大策略：連結未來、連結全球、連結在地，並提出 5+2 產業創新計畫－智慧機械、亞洲・矽谷、綠能科技、生醫產業、國防產業、新農業及循環經濟等。在 5+2 產業創新計畫中的「亞洲・矽谷」推動方案主要在於打造植基於研發的創新創業生態系，基於「推動物聯網產業創新研發」及「健全創新創業生態系」兩項要點，意欲透過物聯網技術與應用的研發來驅動台灣產業的轉型升級，同時藉由創新創業生態圈的建立來促進台灣經濟成長，而本實務應用型研究明確呼應「推動物聯網產業創新研發」此一要點，在與合作企業進行產學合作（彭和李，無日期）的過程中，藉由為該公司的網際網路喇叭(IP Speakers)產品設計並開發一植基於藍牙網狀網路(Bluetooth mesh)及物聯網技術的災害應變輔助廣播系統，期盼藉由物聯網技術的創新應用為合作企業的產品增添附加價值。具體來說，合作企業最初找本團隊進行產學合作計畫，目的是希望本團隊為其網際網路喇叭撰寫必要的韌體程式，在多次商談的過程中，雙方團隊進一步考量到單純網際網路喇叭這樣的產品缺乏包裝，而且市場上同類產品眾多，競爭激烈，若能善用網際網路喇叭本身可以連網又具備記憶體內存空間的特性，跟系統性的物聯網資訊服務整合在一起，則不但可以販售產品本身，更有機會以物聯網資訊服務的方案整合推廣到市場上，帶動新型態服務的商機，讓銷售面向更加廣闊。在此脈絡下，便逐步發展為本實務型研究的成果。

循前所述，本研究故以逐步漸進的模式分階段完成設計、開發與成果展現，先以有線網路實現基礎架構並發表於一研討會中（彭等人，民 110），再於另一研討會中（彭等人，民 111）初步展示部分成果，最後則在本文中呈現完整成果－為完整呈現研究整體風貌，本文將整合展現過去著作中的部分成果及過去尚未發表過的成果。本研究整體系統－也就是植基於 Bluetooth mesh 及物聯網技術的災害應變輔助廣播系統－整合運用微控制器、氣體感測器、喇叭、Bluetooth mesh 通訊模組、PoE 等技術提供了平時廣播(Public Address, PA)、火災偵測、當前最佳逃生路徑之動態研判及適地性語音輔助逃生指引等功能，而本研究期能為合作企業產品所帶來的附加功能與價值就在於後三項功能（火災偵

測、當前最佳逃生路徑之動態研判及適地性語音輔助逃生指引）的設計與開發。

就系統架構而言，整體系統乃由三個子系統所組成，包含了火災偵測子系統、中控子系統及廣播子系統，其中，火災偵測子系統包含了多個火災偵測節點及一閘道器，任一火災偵測節點若偵測到火災，便會將火災信號藉由 Bluetooth mesh 無線通訊機制透過閘道器傳送至中控子系統；再來，中控子系統即後端伺服器，主要負責在收到火災信號時進行火災逃生路徑的動態演算，並將演算結果傳送至廣播子系統；最後，廣播子系統包含了多個廣播節點，會於接收到中控子系統傳達的逃生指引信令後進行相應的適地性逃生指引輔助語音廣播。就系統特色而言，首先，本系統以上層協定規格較統一的 Bluetooth mesh 取代上層協定未統一的 ZigBee 來作為火災偵測子系統內的無線感測網路 (Wireless Sensor Network, WSN)，這將讓合作企業的產品更具互運能力(interoperability)且不受 Bluetooth mesh 元件廠牌的限制，並且可直接使用智慧型手機或平板電腦（Bluetooth 為標配）對火災偵測子系統內各裝置進行組網相關的前置設定，具備 ZigBee 所無法提供的實務優勢；其次，中控子系統具備各火災偵測節點及逃生出口間的兩兩通行鏈結資訊，而由火災偵測子系統傳來的火災信號亦附有節點識別碼，故中控子系統可基於這些資訊運用最短路徑演算法因應火災實際起始點及發展趨勢來「動態計算不同地點的當前最佳逃生方向」，並透過廣播子系統的各廣播節點提供適地性「語音」廣播來輔助不同地點的逃生方向指引，在煙霧瀰漫、視線極差的火災場域中，作為傳統之靜態、視覺性逃生指示設施的輔助，應能更有效地增加逃生成功的機率。

本研究系統經測試後驗證了系統設計確實可行，並且實作雛型亦能正確運作。本論文將完整呈現蒙允公開之系統設計及雛型實作內容，並詳盡說明系統中 Bluetooth mesh 組網的前置設定方式。本研究希望能透過此系統的開發為合作企業的產品增添附加價值，進而對災害應變領域有所貢獻。

本論文後續內容架構編排如下：第二節為相關技術與文獻回顧，第三節整合闡述本研究蒙允公開之整體系統概述、設計與實作，第四節詳盡說明本研究系統中 Bluetooth mesh 組網的前置設定方式，第五節則為結語及未來方向。

二、 相關技術與文獻回顧

由於本研究最主要特色在於選用 Bluetooth mesh 以及加入逃生路徑的動態研判演算法，故針對這兩部分提供較深入的探討。

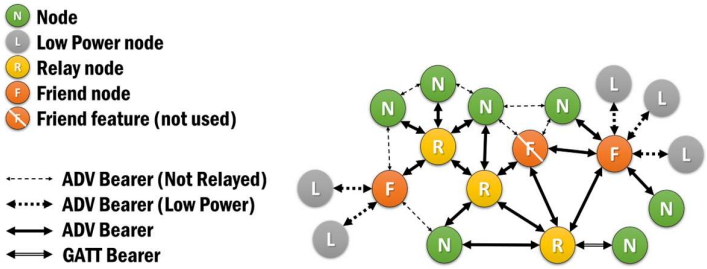
(一) 藍牙網狀網路(Bluetooth Mesh)

在全球供應商產品互運能力(global interoperability)和模組內嵌之廣泛市場佔有率（例如幾乎所有手機和平板電腦皆已內建 Bluetooth 通訊模組）的穩固基礎上，Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG)制定的 Bluetooth mesh 規格(Bluetooth SIG, Inc., n.d.; Kolderup, 2017)在 2017 年七月正式問世，此規格可說是 Bluetooth 規格家族中較新的標準（可見於白皮書(Woolley, 2020)第 6 頁章節 1.0 Introduction 關於 Bluetooth 歷史沿革的簡介），設計初衷是瞄準智慧照明系統中各燈泡間的 mesh 無線通訊，進而亦可回應廣大工商社群對於物聯網 mesh 通訊的需求。根據 Bluetooth SIG 的引介，Bluetooth mesh 規格屬工業級標準，具備諸多優異特性，包含了低耗能、高擴充性、更廣的傳輸範圍、政府等級的安全性、高可靠性及高穩健性等，因此讓廣大工商社群對其懷有廣泛新應用的期待。

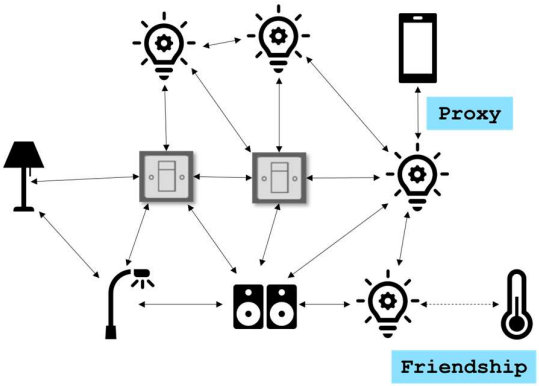
更值得探討的，或許是 Bluetooth mesh 與其他同類型技術的比較：由於 Bluetooth mesh 已提出統一的中上層標準，故較*缺乏上層統一標準而導致供應商產品之間無法互運的 ZigBee 技術*更具優勢；此外，基於低功率藍牙(Bluetooth Low Energy, Bluetooth LE)運作的低耗能特性亦使其超越了*耗能較多的 Wi-Fi mesh 技術*；更重要的是，當今手機和平板電腦幾乎都已內建 Bluetooth LE 模組，故可免透過閘道器、直接使用手機或平板電腦透過 mesh 網路中 proxy node 的橋接來設定及操控各 Bluetooth mesh 網路節點（可見於白皮書(Woolley, 2020)第 17 頁關於 Proxy Nodes 的段落）。這些優勢使 Bluetooth mesh 一問世就受到廣泛關注，成為室內物聯網通訊新要角。

回溯 Bluetooth 規格家族的歷史，一開始，Bluetooth 技術主要用於取代電腦主機及其周邊設備的有線連接，而後，它逐漸發展成各類近距離無線連接的主流技術，形成穩固的全球生態系統，並不斷降低耗能、調整規格以滿足工商社群的需求，尤其是一路從一對一通訊(點對點拓樸、point-to-point topology)、一對多通訊(星狀拓樸、star topology）到當今大量節點的多對多(many-to-many, m:m)通訊（網狀網路拓樸、mesh topology）－亦即本研究所採用的 Bluetooth mesh，回顧這段發展歷史，我們有足夠理由相信，雖然 Bluetooth mesh 技術始於智慧照明系統的應用，但肯定將有更多這項技術適用的場景等待著工商社群的發掘及應用，這將使 Bluetooth mesh 技術像早期的 Bluetooth 及現今的 Bluetooth LE 一樣，開展更廣泛的應用領域。

接下來介紹 Bluetooth mesh 的技術內容：從網路拓樸和訊息傳遞方式的角度來看，Bluetooth mesh 是一種能夠實現多對多節點(nodes)間無線通訊的網狀網路拓樸（可支援多達 32,000 個節點－可參官網常見問題(Bluetooth SIG, Inc., n.d.)中 General Architectural Questions 裡針對 How many nodes can I have in a single network? 的答覆），如圖 1(a)及圖 1(b)所示。在 Bluetooth mesh 網路中，因節點可具備轉送(relay)機制，故遠端節點間通訊也毋須仰賴中控設備或路由器的轉送，此外，它運用受管制的泛洪(managed flooding)方式傳送訊息，使 Bluetooth mesh 網路天生具備多路徑(multipath)備援和自我修復(self-healing)的能力，故可確保通訊的可靠性和穩健性，並且通訊範圍可比原本的 Bluetooth 技術更廣更遠。



(a)



(b)

圖 1. Bluetooth mesh 網路示意圖（分別參照 Bluetooth Specification - Mesh Profile Specification 1.0.1 (Bluetooth SIG, Inc., 2019)第 35 頁圖 2.8 及(Skillermark & Marco, 2017)頁面內文中第二張圖自行繪製）

從 Bluetooth mesh 網路節點功能(features)的角度來看，每個設備在加入 Bluetooth mesh 網路前皆必須透過安全的 provisioning 程序以成為合法的 mesh 節點。每個 mesh 節點都擁有收發 mesh 訊息(message)的基本權限及能力；不僅如此，各 mesh 節點還可擁有一或多種額外的功能(optional features)，包括 Relay、Proxy、Friend 和 Low Power，如圖

1(a)中的各類節點。首先，擁有 Relay 功能的節點被稱為 Relay node，這類節點能夠協助轉發其他節點的訊息，正因有這類節點的轉發功能，使得 Bluetooth mesh 網路內通訊毋須任何中控設備或路由器的介入，也可進行一定程度大範圍的無線傳輸，降低導入此種網路的整體成本；接著，擁有 Proxy 功能的節點則稱為 Proxy node，它所提供的 GATT Bearer，可讓已支援 Bluetooth LE 但尚未支援 Bluetooth mesh 的設備（例如市面上絕大多數的手機和平板電腦）藉由其 Proxy Protocol 存取 Bluetooth mesh 網路、跟網路內其他節點進行通訊（包含可對 mesh 節點進行設定及操控），如圖 1(b)，不必另行開發製造專用於設定及操控網路節點的硬體設備，也毋須特殊閘道器的介入，如此不但可降低開發、生產、導入、部署等成本，更可縮短上市時間(Time to Market)，同時能提升智慧家庭的使用者體驗(User Experience, UE)，因為操作設備的單一性、統一性及便利性，幾乎已是主流趨勢－只需一支手機即可遙控各類智慧家庭裝置及系統，就不必再有一堆互不相容的專屬(proprietary)遙控器佔滿使用者的生活空間了；最後兩類節點是一起運作的－擁有 Friend 功能和 Low Power 功能的節點分別稱為 Friend node 和 Low Power node(LPN)，其中，LPN 通常是「由電池供電」的設備，必須盡量節電，故應只在必要時傳送訊息（如僅在濕度超過某 threshold 時才將濕度資料傳給後端），其餘情況最好休眠、不傳送任何資料，另一方面，非必要也不應讓 LPN 接收訊息－但兩難的是，LPN 有時也需接收設定(configuration)訊息，例如更新濕度 threshold 的訊息。為解決此兩難，或可使用工作/休眠週期循環(duty cycle)的做法，然而 duty cycle 太短可能導致 LPN 無法收到設定訊息，duty cycle 太長又會太耗電，不易找到最佳折衷點。Bluetooth mesh 針對此兩難的解決方案是採用 friendship 的做法，參圖 1(a)及圖 1(b)，讓「電量豐沛無虞的節點」擔任 Friend node（例如由電力系統供電的設備），而所有待傳送給 LPN 的訊息都由 Friend node 負責保存（如同 LPN 的好朋友），LPN 再以超低頻率 poll 其 Friend node 來主動取得這些訊息，解決了前述的兩難問題。

再從協定堆疊(stack)的角度來看，Bluetooth mesh 乃植基於 Bluetooth LE 以上運行，也就是說，Bluetooth mesh 協定堆疊是直接再疊加於 Bluetooth LE 以上，見圖 2，而且完全相容於 Bluetooth 4.0 以上的標準，正因如此，它可如 Bluetooth LE 一樣耗能低，不僅如此，只要滿足某些條件，Bluetooth 4.0 以上的藍牙設備就可藉由升級(upgrade)的方式直接支援 Bluetooth mesh (Bluetooth SIG, Inc., n.d.)。更值得一提的是，從圖 2 可看出 Bluetooth mesh 的標準制定是從 bearer layer 一路包含到 model layer（相當於應用層），

同時也具備產品驗證程序(Bluetooth Qualification Process)(Bluetooth SIG, Inc., n.d.)，如此可促進全球供應商產品的一致性與互運能力，使 Bluetooth mesh 在商業實現層面優於上層規格不統一的 ZigBee 技術。

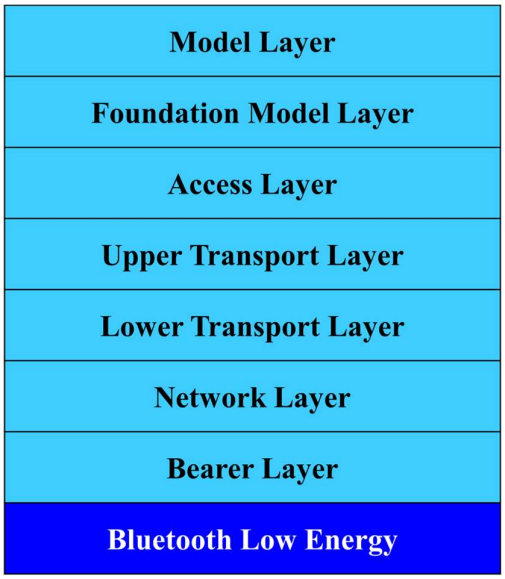


圖 2. Bluetooth mesh 協定堆疊架構圖（參照 Bluetooth Specification - Mesh Profile Specification 1.0.1 (Bluetooth SIG, Inc., 2019)第 17 頁圖 2.1 及(Woolley, 2020)第 19 頁圖 7 自行繪製）

關於 Bluetooth mesh 的 bearer layer，其規範了通訊系統如何處理 mesh 資料單元(Protocol Data Units, PDUs)，白皮書(Woolley, 2020)第 19 頁 Bearer Layer 章節中介紹此層規範了兩種 bearers，包含 Advertising Bearer (ADV Bearer)和 GATT Bearer，其中，Advertising Bearer 可透過 Bluetooth LE 的 GAP advertising 和 scanning 功能來收送 mesh PDUs（mesh 節點皆擁有此種 bearer），而 GATT Bearer 可供不支援 Advertising Bearer 的 Bluetooth LE 設備（例如僅支援 Bluetooth LE 但不支援 Bluetooth mesh 的手機或平板電腦）透過 Proxy Protocol 藉由 Proxy node（同時具備 GATT Bearer 及 Advertising Bearer）間接跟具有 Advertising Bearer 的 mesh 節點通訊，如圖 3。

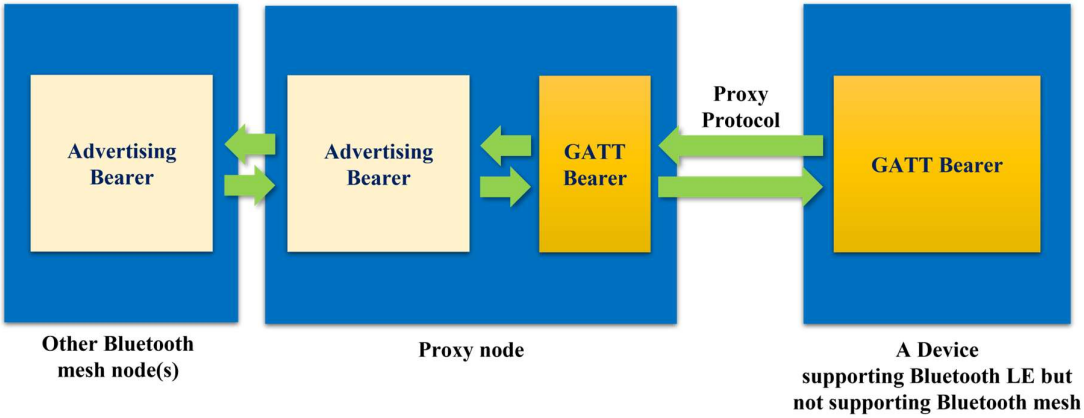


圖 3. Bearer layer 中 Advertising Bearer 和 GATT Bearer 的運作示意圖

再上一層的 network layer 規範了網路訊息格式(network message format)和數種訊息位址類型(message address types)，前述的 Relay 和 Proxy 功能可(may)於此層實作。在此值得特別一提的是，Bluetooth mesh 訊息的送收是運用 Publish/Subscribe 的方案，如圖 4，欲*傳送*訊息的 mesh 節點（例如開關）會將該訊息 publish 給某個指定的位址（例如 bedroom）；而被動的 mesh 節點（例如檯燈）則是藉由已 subscribe 某個（些）位址來*接收*傳送至這個（些）位址的訊息。

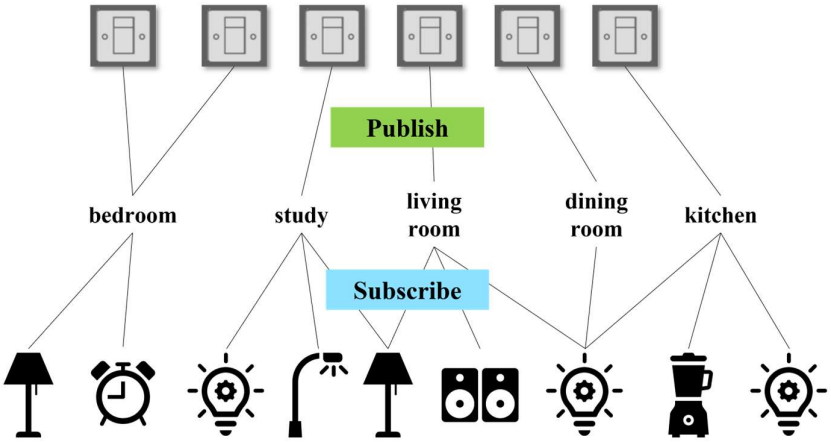


圖 4. Publish/Subscribe 示意圖（參照(Woolley, 2020)第 10 頁圖 4 自行繪製）

再上一層的 lower transport layer 負責切割及重組 PDUs；而其上一層的 upper transport layer 則針對應用層資料進行加解密及認證；再往上的 access layer 規範了應用層資料的格式，並且定義與控制其下層 upper transport layer 的加解密程序，還須確認從 upper transport layer 收上來的資料是否送入正確的應用程序；再往上的 foundation model layer 供實現「mesh 網路設定與管理相關」的 models；最後，位於最上層的 model layer 則供實現各式各樣的「應用」models，包括行為(behaviors)、訊息(messages)、狀態(states)、

狀態繫結(state bindings)……等，其中，各 mesh 節點皆可具備一至多個 elements，而各 element 又可具備一至多個 models，如圖 5。在此值得進一步補充說明的是，前段所述的 network layer，其訊息位址定址是針對 mesh 節點中的 element，而非針對 mesh 節點。另外，Bluetooth SIG models 是在 Bluetooth Mesh Model Specification (Bluetooth SIG, Inc., 2019)中規範，雖然供應商也可以規範自己的供應商模型(vendor models)，但前提是必須在完全無法使用 Bluetooth SIG models 滿足需求的情況下才能進行，而且使用供應商模型時也必須謹慎以對（參(Woolley, 2019)頁面內文 Model Communication and Behaviors 章節中的第三段）。

本研究選擇使用 Bluetooth mesh 代替 ZigBee 作為火災偵測子系統內部的無線感測網路，這是因為前面已充分闡述過之 Bluetooth 及 Bluetooth mesh 的廣泛市場接受度、各層協定全面標準化以及手機直接操控支援度等優勢。此決策可說是本研究系統最主要的特色。

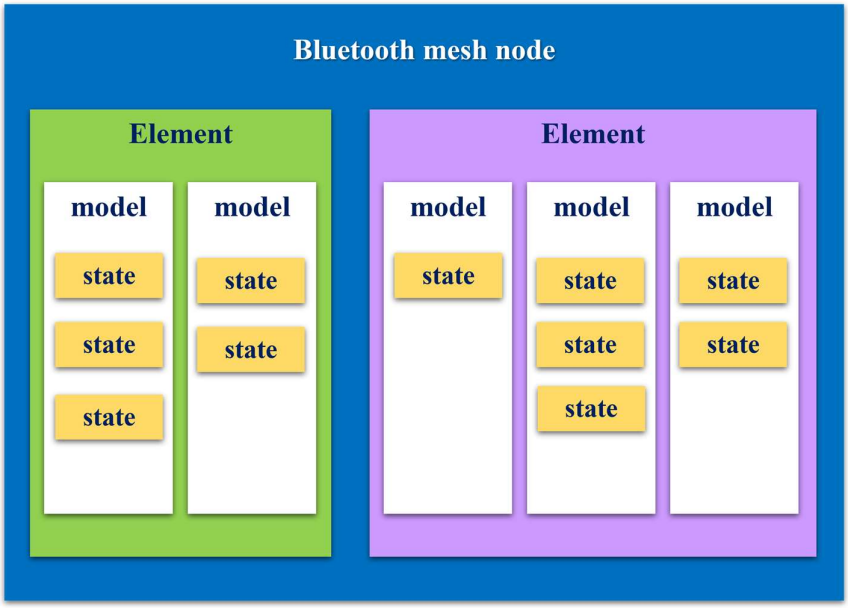


圖 5. Bluetooth mesh 節點、elements 及 models 間的關係示意圖（參照 Bluetooth Specification - Mesh Profile Specification 1.0.1 (Bluetooth SIG, Inc., 2019)第 24 頁圖 2.2 及(Woolley, 2019)頁面內文中第二張圖自行繪製）

(二) 火災偵測與逃生指引系統文獻回顧

2020 年四月發生於台北市錢櫃 KTV 的火災，造成六人死亡及數十人受傷，這場 KTV 大火引起了社會的嚴肅關注。火災起火點（四樓）和造成嚴重傷亡的地點（八樓）

竟然相距數層樓高，官方檢討報告及出庭作證的台北市消防局林姓火調專員（林等人，民 112；孫等人，民 109；高峰公職，民 109）指出，起因是一樓消防受信總機電源被關閉，故沒有發出緊急警報，排煙系統也無法運轉導致室內煙氣無法排除，消防設備亦無法發揮作用，此外，樓層間的安全門未關閉，無法阻斷樓層間的火及濃煙，再加上電梯施工形成的直立孔道「煙囪效應」，讓濃煙快速擴散到每一個樓層，不僅如此，排煙風管被切除，四樓自動撒水器被拆除，地下室幫浦也被關閉，室內消防栓無法加壓，導致無法進行撒水滅火，使得火勢快速延燒整棟錢櫃大樓。從逃生面來看，這場火災暴露了兩個問題：一是「不知道要逃」，二是「知道要逃，但濃煙密布、情急之下不知道怎麼逃和往哪裡逃」，本團隊作為資訊科技從業者，無法從消防專業、政府政策法規及法律面提出肇因於人為疏失的改善策略，但可以從自己的領域出發，探求是否能透過新興物聯網科技建立一套配合現有消防設施的輔助性災害應變系統，以減少悲劇發生。

承前所述，火災涉及到人命安全，因此多年來火災偵測與逃生指引系統一直是許多研究者、消防設備商、政府機構及民間單位的研究重點。無論是在研究計畫、論文、專利，甚至是商用產品及服務，相關成果已累積不下數百件(Barnes et al., 2007; Chen et al., 2019; Depari et al., 2018; Jiang, 2019; Kelly, 2020; Khan et al., 2018; Lee et al., 2020; Wang et al., 2019; Zavin et al., 2018; Zhou et al., 2019; Zualkernan et al., 2019; 游等人, 民 104; 瑞德感知, 無日期)。就前述這些參考文獻而言，導入資訊科技的火災應變相關研究或產品，可以從多個不同面向來進行觀察：從火災偵測的角度來看，已被納入研究或產品開發的主要感測器包括氣體感測器（例如偵測可燃氣體和煙霧的 MQ-2 氣體感測器）、溫度感測器、濕度感測器、火焰感測器及影像辨識攝影機等；在火災現場設備之間的防災通訊方面，已引入的無線通訊技術包括 ZigBee、Wi-Fi、LoRa 和 Bluetooth mesh 等；至於逃生指引工具，已包括動態逃生標誌（部分已附加語音指引）、導引機器人和行動裝置應用程式等；而在逃生指引演算法方面，經典的最佳路徑演算法諸如 Dijkstra's (Wang et al., 2019)和 A* (Lester, 2005)演算法已被運用，並且路徑成本值或權重的設定亦各有千秋，通常會考量逃生距離、逃生路徑/出口擁擠程度、起火點、火勢發展狀態及煙勢發展狀態等，其中，有些是集中式運算，也就是實作演算法於中央伺服器內，完成路徑運算後再將結果傳送至終端節點提供逃生指引，而有些則採分散式運算，亦即將演算法分散式地實作於終端節點內；最後，關於火場內人員（包括民眾和消防隊員）或起火點的定位方式，研究者已使用過 Bluetooth beacon 和影像辨識等。

在台灣既有法規下，逃生系統除靜態標示外，亦已有語音廣播的存在，*本研究與既存系統的差異性*如下：A. *動態適地性語音指引*：現有語音逃生廣播系統，通常僅能提供整體性、靜態的逃生語音指引，無法因應火災的實際起始點及瞬息萬變的發展狀況動態地調整並提供符合各區域的最新逃生方向指引。相較之下，本研究系統具備動態計算各區域當前最佳逃生路徑的能力，並透過廣播子系統提供適地性的語音指引，有助於在瞬息萬變的火場環境下，更準確地為各區域人員指引逃生方向。B. *結合物聯網感測技術*：承 A.，傳統語音逃生廣播系統，其語音指引內容無法實時反映現場的實際狀況變化。本研究系統則導入了物聯網感測技術，讓系統後端的動態路徑演算法有所本，能即時根據火災偵測子系統所蒐集到的火災發展實況，動態調整語音指引的內容，進而提供更貼近現場的逃生指引。C. *彈性擴充應用範疇*：本研究所設計的系統架構，基於模組化原則分為三大子系統，未來若有需要，可進一步擴充火災偵測子系統的設施以監測更多災害因子，或整合其他資料來源，使系統的應用範疇得以擴及更多災害類型，不僅限於火災逃生。D. *商業模式上的創新應用*：本研究的出發點是為網際網路喇叭產品賦予新的應用價值，開拓新的服務營收模式。這與現有系統的商業定位不同，具有創新的應用思維。總括而言，本研究系統相較現有語音逃生廣播系統，不僅提供了動態適地性的語音逃生指引，還導入物聯網感測技術實現即時感知，並具備彈性擴充應用範疇的潛力，同時也體現了創新的商業應用模式思維。另一方面，以下亦特別*針對台灣廠商「瑞德感知」（瑞德感知，無日期）現有技術及本研究成果進行比對*：A. *兩者目標與定位不同*：「瑞德感知」的定位是消防設備供應商，而本研究的目標則是為合作企業的網際網路喇叭產品開拓新的服務營收模式，定位在於物聯網資訊服務的提供者。B. *兩者技術元素不同*：「瑞德感知」現有技術主要是視覺型指示設施，本研究則提供聽覺型動態適地性指引。綜合來說，雖然都與災害應變逃生指引相關，但因目標定位及技術元素並不相同，本研究與「瑞德感知」現有技術間仍存有差異性。

在探討完眾多研發成果後，我們再次回到本研究的背景、動機和目的，來闡述*本研究的取向*。第一，本研究的合作企業不是消防設備商，故本研究並非旨在與現有或新興的消防設備業者競爭，而是要為合作企業 IP speaker 產品設計具附加價值的應用服務，並實作出此應用服務的系統雛型，為合作企業開拓新的服務領域及商機，而*將 IP speaker 這個產品融入災害應變流程*，就是本研究賦予該產品附加價值的方式，具體而言，廣播系統隨處可見，能在現行的廣播系統中，活用 IP speakers 的網路通訊能力、儲存能力及

數位語音播放能力來為廣播系統附加災害應變語音指引功能，就是本研究的精神所在，故*演算繁複及功能龐雜的設計並非本研究的意旨*，本研究系統設計的重點是在於*簡單可行*且*僅為輔助應變性質*，絕非意圖取代現行的消防設施，亦非要與前述文獻成果一較長短。其次，合作企業在開發和銷售 Bluetooth 無線耳機方面已擁有豐富的經驗及成果，其內部研發團隊也非常了解 Bluetooth LE 的技術，而本研究團隊也長期深耕於無線通訊領域，現在，本研究將 Bluetooth mesh 引入作為本研究系統的無線傳輸技術，可說是結合了雙方團隊厚實的技術基礎，進一步探討、研發，可大幅延伸雙方豐沛的研發能量，再基於前面針對 Bluetooth mesh 之於其他同類型無線感測網路技術的比較論述，故決定將 Bluetooth mesh 導入本研究系統亦為重要取向。

三、 系統概觀、設計與實作

(一) 系統概觀

如前所述，本研究旨在設計並實作一套結合 Bluetooth mesh 及物聯網技術的災害應變輔助廣播系統。此系統運用微控制器、氣體感測器、喇叭、Bluetooth mesh 通訊模組及 PoE 等技術提供以下四項主要功能：(1). 平時廣播、(2). 火災偵測與通報、(3). 火災逃生路徑動態演算、(4). 適地性語音輔助逃生指引，可搭配建築物內既有的消防設施共同輔助人們進行逃生。本研究系統的架構主要分成三個子系統：(1). 火災偵測子系統、(2). 中控子系統（後端伺服器）、(3). 廣播子系統，如圖 6，這三個子系統彼此之間是透過有線網路及 PoE switch 彼此互相連結，此外，火災偵測子系統內部的無線感測網路（包含火災偵測節點及閘道器）則是藉由 Bluetooth mesh 連結起來。下一小節將介紹系統設計與實作的細節。

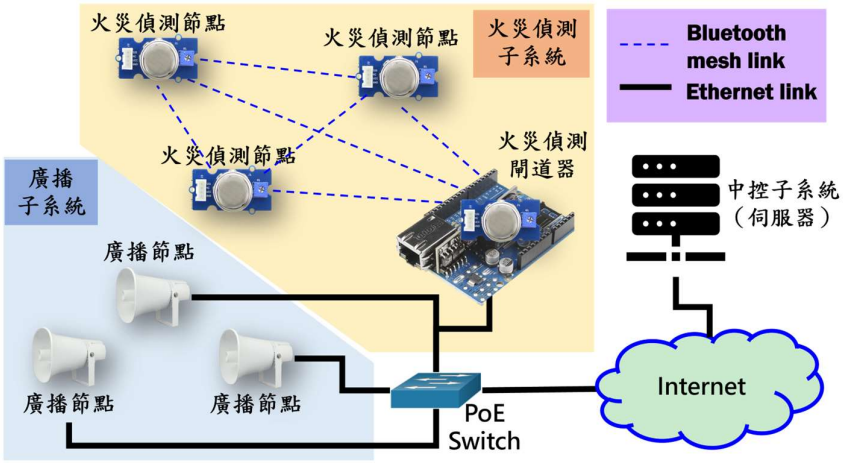


圖 6. 系統架構圖（彭等人，民 111）

(二) 系統設計與實作

1. 火災偵測子系統

這個子系統主要包含一個火災偵測閘道器（簡稱閘道器）和多個火災偵測節點。閘道器橋接起此子系統及中控子系統之間的通訊，它對此子系統內部是採 Bluetooth mesh 通訊，而它對中控子系統則透過 Ethernet 進行通訊，故本研究採用「nRF52840 Mini 藍牙開發板」和「搭載 Ethernet shield 的 Arduino UNO 微控制器開發板」來構建閘道器－前者負責內部通訊，後者負責與中控子系統進行通訊，而兩塊開發板之間則由 UART 進行連接，其電路設計圖見圖 7，而實際製作成品則見圖 8。另一方面，本研究採用 nRF52840 Mini 藍牙開發板及 MQ-2 氣體感測器實作各火災偵測節點，其電路設計圖見圖 9，而實際製作成品則見圖 10。值得注意的是，要讓此子系統內部的 Bluetooth mesh 正常運作，必須事先完成相關的前置設定，這部份將於第四節詳細介紹。

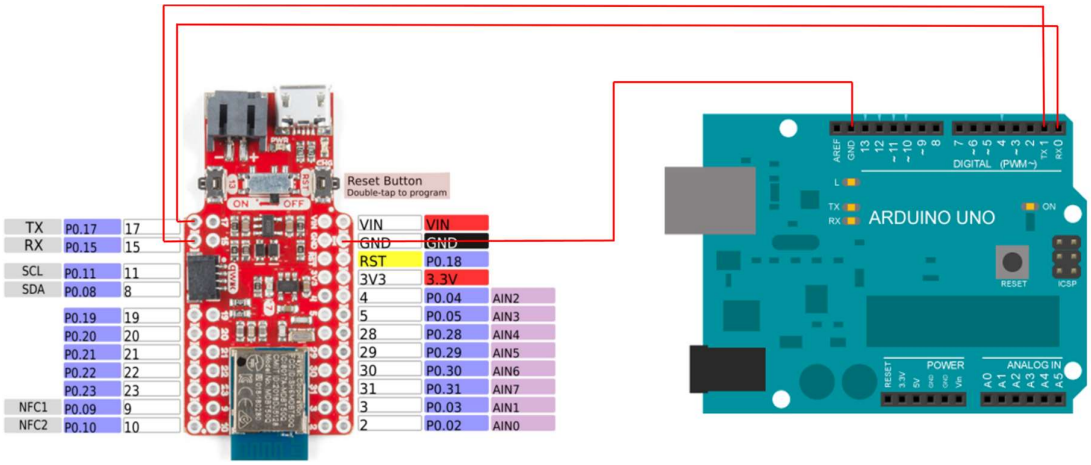


圖 7. 電路設計圖－火災偵測閘道器（彭等人，民 111）

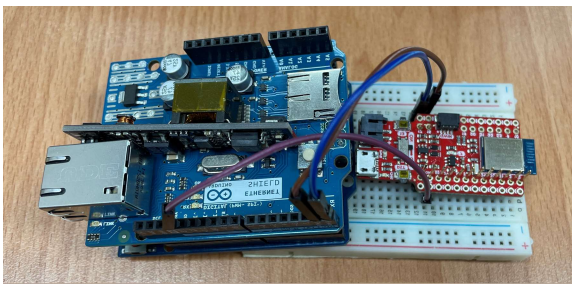


圖 8. 實際製作成品－火災偵測閘道器（彭等人，民 111）

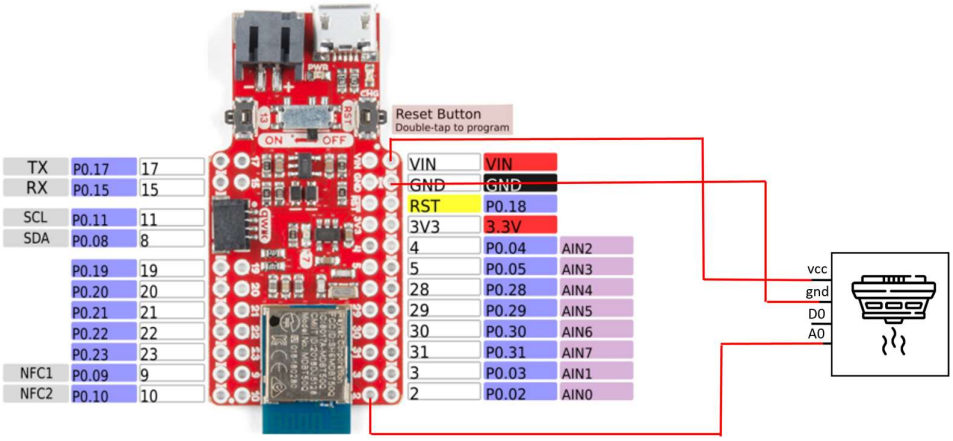


圖 9. 電路設計圖－火災偵測節點（彭等人，民 111）

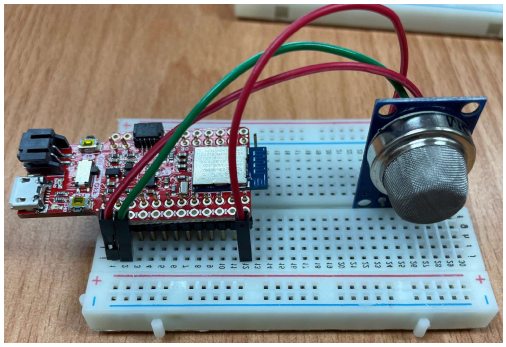


圖 10. 實際製作成品－火災偵測節點（彭等人，民 111）

針對空氣中的可燃物質濃度，火災偵測節點是透過 MQ-2 氣體感測器進行偵測，並將偵測結果轉換成對應的輸出訊號。僅*異常感測值*會連同*節點識別碼*一起封裝為火災信號，透過 Bluetooth mesh 被發送至閘道器。閘道器若接收到火災信號，就會藉由 Ethernet 將該信號轉發至中控子系統。以下分別說明火災偵測節點和閘道器的韌體開發及運作細節。

(1) 火災偵測節點

本研究使用 C 語言在 Embedded Studio 環境中撰寫火災偵測節點的韌體程式，如圖 11 所示。開發過程中需要使用 nRF5 SDK for Mesh 的官方函式庫，並結合其 mesh sensor 範例的 server 及 ssadc 範例來實作。其中，ssadc 範例用於讀取類比腳位的電壓值，而 mesh sensor 範例的 server 則負責將火災信號透過 Bluetooth mesh 傳送出去。藉由這兩者的結合，火災偵測節點就能夠取得並轉換感測值，並根據事先設定的 threshold 在判斷出感測值異常時，將火災信號（包含感測值及節點識別碼）透過 Bluetooth mesh 傳送出去，不僅如此，根據 Bluetooth mesh 的運作方式，每個接收到此火災信號的 Relay 節點也會幫忙轉送信號，直到此信號送達閘道器。

```
_adc = (int)_adc / SAMPLES_IN_BUFFER;

if(_adc > 0){
  if(Ro<0){
    begin();
    printf("Ro: %d\n", (int)Ro);
  }
  float lpg = readLPG();
  float co = readCO();
  float smoke = readSmoke();
  if(lpg> lpg_warning){
    m_pir_motion_sensed_in_period = lpg;
    (void)sensor_status_publish(&m_sensor_server_0, SENSOR_MOTION_SENSED_PROPERTY_ID);
  }
  if(lpg> co_warning){
    m_pir_motion_sensed_in_period = co;
    (void)sensor_status_publish(&m_sensor_server_0, SENSOR_MOTION_SENSED_PROPERTY_ID);
  }
  if(lpg> smoke_warning){
    m_pir_motion_sensed_in_period = smoke;
    (void)sensor_status_publish(&m_sensor_server_0, SENSOR_MOTION_SENSED_PROPERTY_ID);
  }
}
```

圖 11. 韌體程式碼（部分）－火災偵測節點

(2) 火災偵測閘道器

火災偵測閘道器的 nRF52840 Mini 端韌體程式同樣是以 C 語言於 Embedded Studio 環境中撰寫，如圖 12，在開發過程中，是採用與火災偵測節點相同的函式庫，並結合 mesh sensor 範例的 client 和 uart 範例來實作，其中，mesh sensor 範例的 client 負責接收 server 傳來的火災信號（此 server 就是前述撰寫在火災偵測節點內的 server 程序），而 uart 範例則是 nRF52840 Mini 端與 Arduino UNO 端之間的通訊橋樑，讓兩端能透過 UART 進行通訊。另一方面，本研究採用 Arduino 語言在 Arduino IDE 環境中撰寫 Arduino UNO 端的韌體程式，其主要任務就是分別透過 UART 跟 nRF52840 Mini 端通訊以及透過有線網路運用 Ethernet 函式庫跟中控子系統通訊。當 nRF52840 Mini 端接收到從火災偵測節點傳來的火災信號時，會將該信號藉由 UART 傳遞給 Arduino UNO 端；接著，Arduino UNO 端會再將該信號藉由 Ethernet 轉發至中控子系統。

```
if (SENSOR_MOTION_SENSED_PROPERTY_ID == sensor_data.mpid.property_id)
{
    uint8_t b_exp;
    uint8_t value = sensor_percentage8_parse(*(sensor_data.raw_value), &b_exp);
    __LOG(LOG_SRC_APP, LOG_LEVEL_INFO,
          "Sensor client: 0x%04x, type=%d, raw value: %d, value: %d.%d\n",
          p_meta->src.value, p_meta->src.type,
          *(sensor_data.raw_value),
          value, b_exp);
     printf("%d\n", *(sensor_data.raw_value));
}
else if (SENSOR_PRESENCE_DETECT_PROPERTY_ID == sensor_data.mpid.property_id)
{
    uint8_t value = *(sensor_data.raw_value);
    __LOG(LOG_SRC_APP, LOG_LEVEL_INFO,
          "Sensor client: 0x%04x, type=%d, raw value: %d, value: %s\n",
          p_meta->src.value,
          p_meta->src.type, value,
          value?"presence detected":"no presence detected");
}
else
{
    __LOG(LOG_SRC_APP, LOG_LEVEL_INFO, "unsupported property id 0x%X\n", sensor_data.mpid.property_id);
}
__LOG(LOG_SRC_APP, LOG_LEVEL_INFO,
      "format=%d, length=%d, property_id: 0x%X\n",
      sensor_data.mpid.format,
      sensor_data.mpid.length,
      sensor_data.mpid.property_id);
```

圖 12. 韌體程式碼（部分）－火災偵測閘道器

2. 中控子系統

這個子系統是採用 XAMPP 架設的後端伺服器，其主要功能包括：(1). 記錄各節點及逃生出口兩兩之間的通行鏈結資訊，其中，這些鏈結會形成逃生路徑邏輯網路拓樸（簡稱逃生拓樸），而各鏈結的初始成本必須根據系統實際部署場域的真實情況加以設定（例如依據點到點間的實體距離）；(2). 接收來自火災偵測子系統的火災信號，並從信號中取得節點識別碼；(3). 根據此識別碼及下一段介紹的簡易逃生路徑演算法，生成逃生拓樸中各節點對應的逃生方向，然後，將相應的逃生指引信令傳送至廣播子系統中的各廣播節點（這些信令會觸發各廣播節點依照個別信令來播放相應的適地性逃生指引語音）。

本研究的簡易逃生路徑演算法（簡稱本研究演算法）與「火災偵測節點及廣播節點的實體部署方式」密切相關。儘管在系統設計方面，火災偵測節點和廣播節點屬於不同的子系統（分別為火災偵測子系統和廣播子系統），但在系統實體部署方面，本研究是將各火災偵測節點都搭配一個廣播節點，兩兩部署在一起，故本系統之逃生拓樸中的各節點均代表一組「火災偵測節點及廣播節點」（如圖 13 中的節點 1 ~ 8）或一個「逃生出口」（如圖 13 中的 Exit）。

關於逃生路徑的研判，本研究選用 Dijkstra's 演算法(Wang et al., 2019)來找出個別

節點到各逃生出口的最短路徑。如前所述，各鏈結的初始成本必須根據系統實際部署場域的真實情況加以設定，為了描述之便，本論文以圖 14 中所假設的鏈結成本作為初始狀態，並將初始時由 Dijkstra's 演算法所找出的最短路徑結果及其所指示的各節點逃生方向示意於圖中。

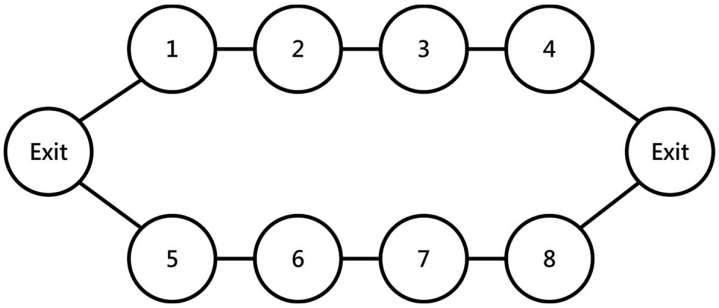


圖 13. 本系統之逃生拓樸範例示意圖

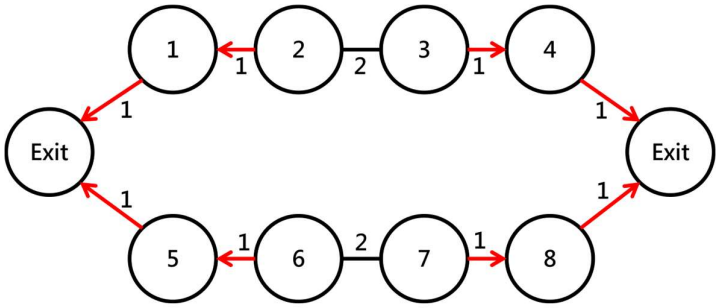


圖 14. 初始時運用 Dijkstra's 演算法找出的圖 13 逃生路徑

於前述初始化階段之後，本研究演算法被觸發進行運算必然是發生在「至少一個節點偵測到火災時」，因此，一旦任一節點偵測到火災並通報給中控子系統，本研究演算法就會將該節點（如圖 15 中的節點 1）連外的各段鏈結成本皆設定為無限大（代表火災發生、不可通行），然後再次使用 Dijkstra's 演算法找出個別節點到各逃生出口的最短路徑（注意圖 15 中節點 2 的逃生方向已變更），最後再依照此結果，透過 HTTP requests 把相應的逃生指引信令傳送至各廣播節點，觸發個別廣播節點依照所收到的信令播放相應的預錄逃生指引語音。以此類推，若火勢持續發展，圖 16 中的節點 5 也偵測到火災並通報給中控子系統，本研究演算法就會將節點 5 連外的各段鏈結成本也都設定為無限大（代表火災發生、不可通行），並再度使用 Dijkstra's 演算法找出最新逃生路徑（注意圖 16 中節點 6 的逃生方向也已變更）並觸發各節點進行個別廣播。循此，本研究演算法可根據起火點及火勢發展不斷*動態地*更新當前火場中的最新逃生路徑，並將此結果相應的逃生指引信令傳送至各廣播節點，提供各節點所在區域的最新逃生方向廣播（屬於一種

適地性服務/Location-based Service/LBS），作為靜態逃生指示設施的輔助，期能帶來更高的逃生成功機率。

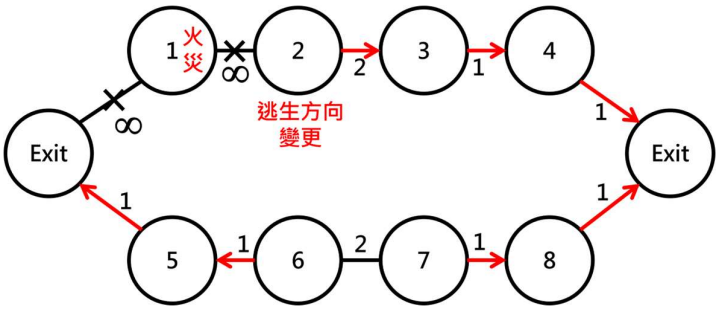


圖 15. 節點 1 偵測到火災後運用 Dijkstra's 演算法動態更新的圖 13 逃生路徑

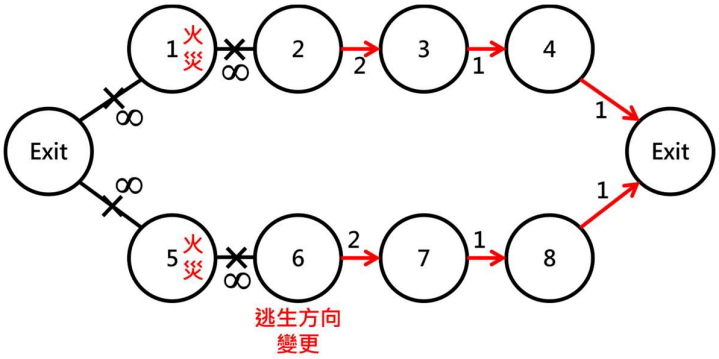


圖 16. 節點 5 亦偵測到火災後運用 Dijkstra's 演算法動態更新的圖 13 逃生路徑

3. 廣播子系統

這個子系統包含多個廣播節點。須注意的是，由於本研究實作的系統為實驗室雛型，故並未直接使用合作企業的 IP speaker 產品擔任廣播節點，而是改採整體成本較低的 Arduino UNO 開發板（附有 Ethernet shield 及 microSD 模組）、microSD 卡、電晶體 BC547 和 8 歐姆喇叭來開發以模擬之，其電路設計見圖 17，而實際製作成品則見圖 18，其中，microSD 卡用於儲存預錄的數則逃生指引語音數位音檔，電晶體 BC547 用於提升喇叭播放的聲音清晰度，而電力來源以及跟中控子系統之間的通訊則均由 PoE switch 和 Ethernet 網路線提供（可回顧圖 6）。此子系統中的各廣播節點都能接收來自中控子系統的逃生指引信令，並依照收到的信令播放相應的預錄逃生指引語音。

本研究使用 Arduino 語言在 Arduino IDE 環境中撰寫廣播節點的韌體程式，如圖 19，在韌體程式中，使用 Arduino 的 SD 函式庫進行 microSD 卡內容的讀寫，包含將預錄音檔存放至 microSD 卡內，以及收到逃生指引信令時讀取 microSD 卡內相應的預錄音檔，

再使用 Arduino 的 TMRpcm 函式庫進行預錄音檔的播放。而網路通訊方面則運用 Arduino 的 Ethernet 函式庫。本研究採用 HTTP request/response 的模式實作逃生指引信令的傳達與接收回報，其中，HTTP server 端是實作在廣播節點上，而中控子系統內則實作有 HTTP client 端，故中控子系統可將信令封裝於 HTTP requests 內傳送至各廣播節點，而廣播節點接收到信令後，則會播放相應的預錄音檔並回傳 HTTP response 給中控子系統作為接收回報。

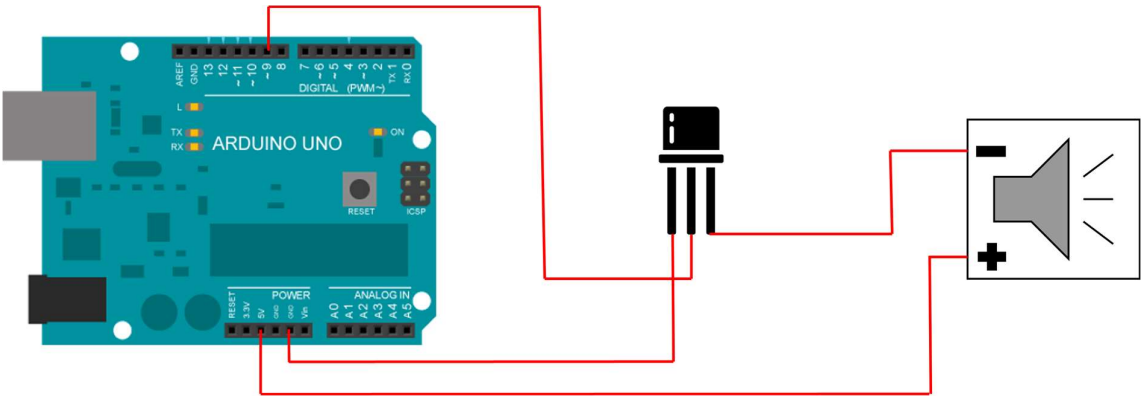


圖 17. 電路設計圖－廣播節點（彭等人，民 111）

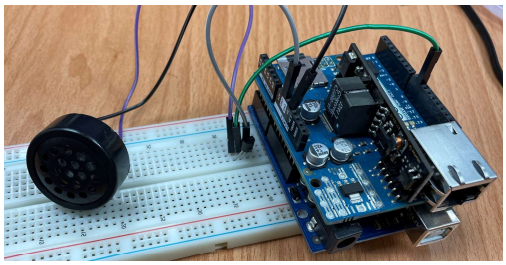


圖 18. 實際製作成品－廣播節點（彭等人，民 111）

```
boolean currentLineIsBlank = true;
while (client.connected()) {
  if (client.available()) {
    char c = client.read();
    str += c;
    if (c == '\n' && currentLineIsBlank) {
      // send a standard http response header
      Serial.println(str);
      Serial.println(str.indexOf("1.wav"));
      if(str.indexOf("1.wav") != -1){
        tmrpcm.play("1.wav");
        break;
      }
      else if(str.indexOf("2.wav") != -1){
        tmrpcm.play("2.wav");
        break;
      }
      else if(str.indexOf("3.wav") != -1){
        tmrpcm.play("3.wav");
        break;
      }
      else if(str.indexOf("4.wav") != -1){
        tmrpcm.play("4.wav");
        break;
      }eak;
      }
      client.println("HTTP/1.1 200 OK");
      client.println("Content-Type: text/html");
      client.println("Connection: close");  // the connection will be closed after completion of the response
      client.println("<!DOCTYPE HTML>");
      client.println("<html>");
      client.println("</html>");
      str = "";
      break;
```

圖 19. 韌體程式碼（部分）－廣播節點

四、 藍牙網狀網路(Bluetooth Mesh)組網之前置設定

因本研究系統採用基於 Nordic 半導體 nRF52840 為基礎的 SparkFun Pro nRF52840 Mini 藍牙開發板實作火災偵測子系統內的各節點及閘道器，故在此子系統中的 Bluetooth mesh 開始運作前，需先行使用 Nordic 半導體公司提供的 nRF Mesh 行動裝置應用程式（簡稱 App）進行前置設定。接下來將詳細描述此前置設定的整體流程，需先澄清兩個詞彙：火災偵測節點屬於無線感測網路中的 sensor server（感測資料提供者），而火災偵測閘道器則屬於其中的 sensor client（感測資料接收者），釐清此兩詞彙後將有助於理解以下整體流程。

流程初始時就是將火災偵測子系統內的各裝置依循安全的 provisioning 程序逐一加入 Bluetooth mesh 網路（後簡稱 mesh 網路）中成為合法的節點。這部份流程如下（見圖 20）：首先進入 App 的 Network 分頁，點選 App 右上角的“+”號（如圖左一），觸發行動裝置對周遭支援 Bluetooth mesh 的裝置進行掃描。App 會列出掃描結果，即支援 Bluetooth

mesh 的裝置清單，此時可以逐一點選欲納入 mesh 網路的裝置（如圖左二）。選取清單中的任一台裝置（如火災偵測節點－nRF5x Mesh Sensor Setup Server），App 會轉到該裝置的設定頁面，接著需點選右上角的“Provision”（如圖左三）。App 會彈出“Select OOB Type”選單，由於此例是針對火災偵測節點(sensor server)，故本研究選取了“No OOB”（如圖左四）。完成選取後，該裝置就已成功加入 mesh 網路，隨後可以對其執行進一步的設定。

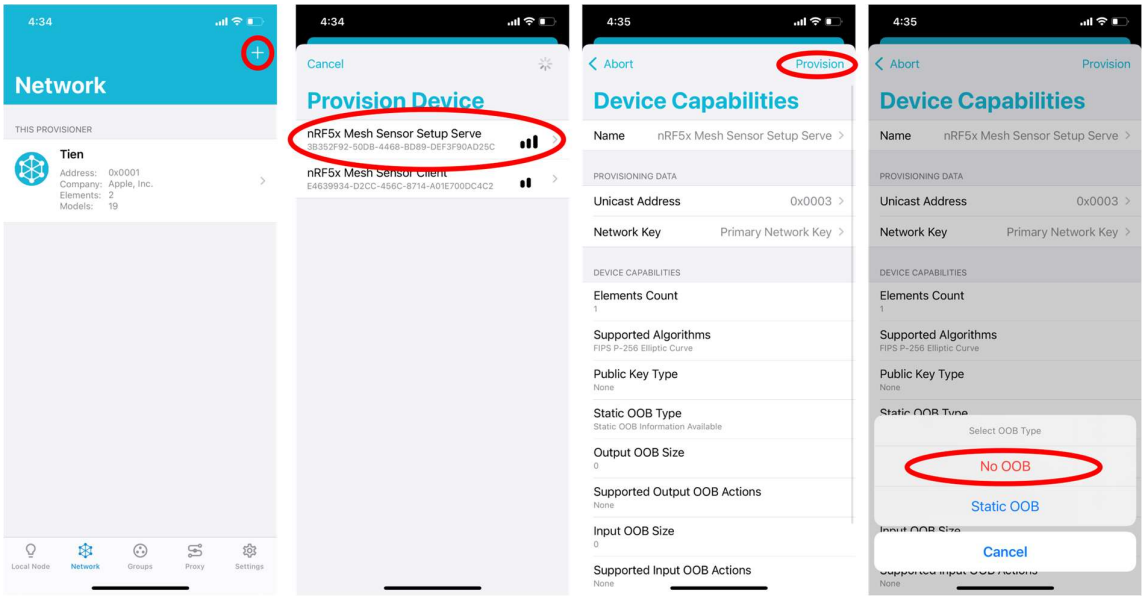


圖 20. 前置設定：將裝置加入 mesh 網路（彭和李，無日期）

執行下一部份的設定前，還需先生成一把 Application Key，這把 Key 將專屬於此 mesh 網路的火災偵測應用。這部份流程如下(見圖 21)：首先進入 App 的 Settings 分頁，然後點選 Application Keys（如圖左一）。App 會轉到 Application Keys 頁面，此時點選右上角的“+”號（如圖左二）便進入 Add App Key 頁面，設定好 Key 的名稱（此例是 App Key 1）後，點選 Done（如圖左三），App 會返回 Application Keys 頁面，此時已生成了一把火災偵測應用的 Application Key (App Key 1)（如圖左四）。

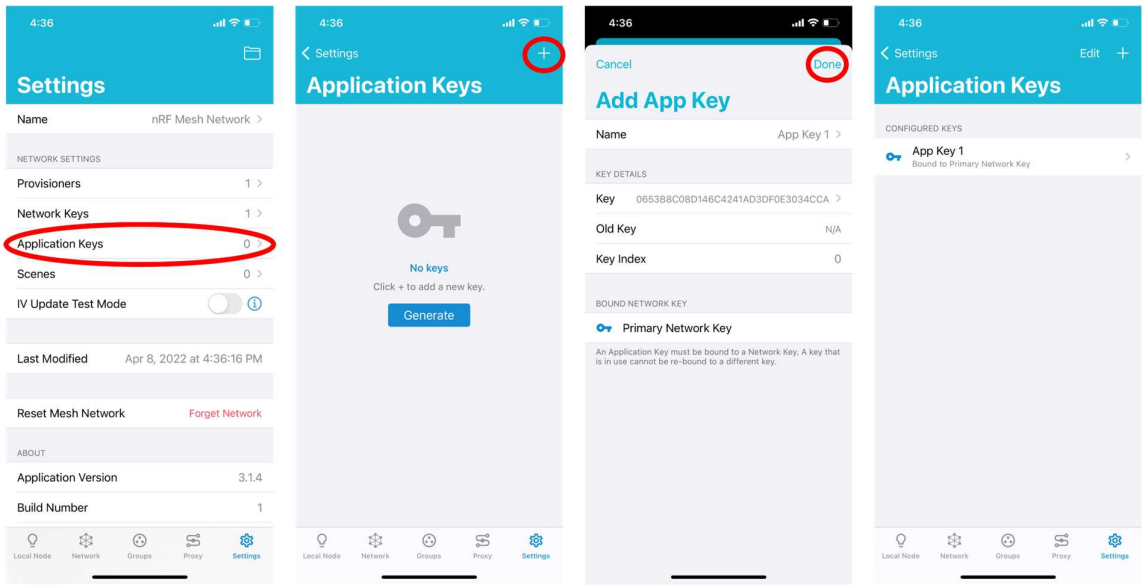


圖 21. 前置設定：為火災偵測應用生成一把 Application Key（彭和李，無日期）

接下來可新增一個專屬於此應用的 Publish/Subscribe 位址名稱（可回顧圖 4）。這部份流程如下（見圖 22）：首先切換到 App 的 Groups 分頁，然後點選右上方的“+”號（如圖左一）讓 App 轉到 Add Group 頁面，編輯好 Publish/Subscribe 位址名稱（此例是 New Group）後即可點選 Done（如圖左二），此時 App 就會返回 Groups 頁面，可看到 Publish/Subscribe 位址名稱也已新增完成（如圖左三）。

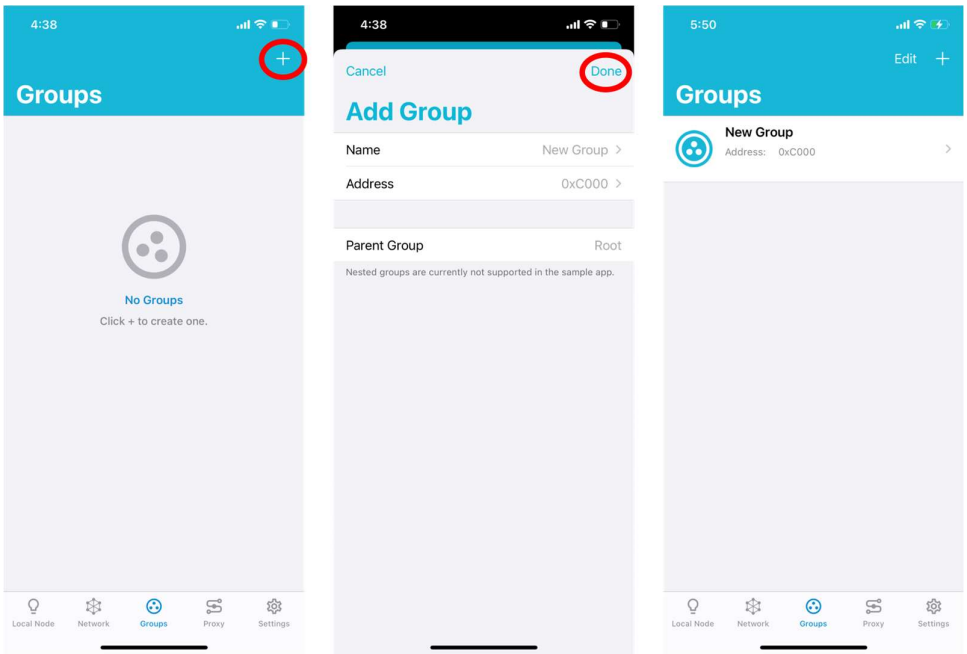


圖 22. 前置設定：為 mesh 網路新增 Publish/Subscribe 位址名稱（彭和李，無日期）

現在再回到 App 的 Network 分頁，將 Application Key (App Key 1)逐一設置給 mesh 網路中的各裝置。這部份流程如下（見圖 23）：首先逐一點選 Network 分頁中的各裝置，分別設置 Application Key，如圖左一例是點選了 Server 這台裝置（為一火災偵測節點），App 循此轉至此裝置的頁面。然後點選 Application Keys（如圖左二），App 會轉到 Application Keys 頁面。此時點選右上角的“+”號（如圖左三），App 會轉到 Add Application Key 頁面，然後可選取先前已新增的 Application Key (App Key 1) 再點選 Done（如圖左四）讓 App 返回 Application Keys 頁面，而該裝置的 Application Key 設置也已完成（如圖左五）。

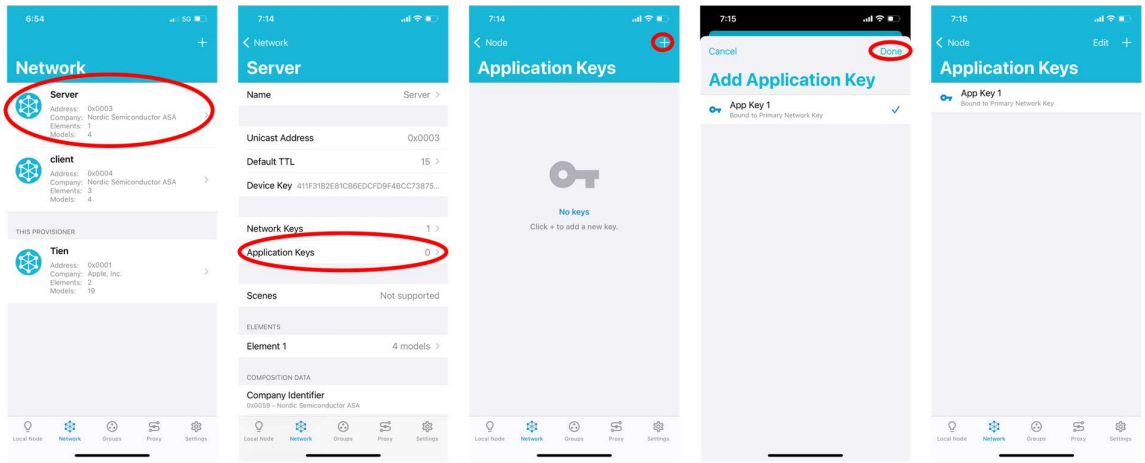


圖 23. 前置設定：將 Application Key 設置給 mesh 網路中的各裝置（彭和李，無日期）

接下來是綁定的動作－前述已設置給裝置的 Application Key (App Key 1)還必須進一步跟該裝置內上層的特定 model 綁定起來（可回顧圖 2 及圖 5）。這部份流程如下（見圖 24）：延續圖 23 左二，改為點選 Element 1（如圖 24 左一，注意此例是針對火災偵測節點在設定）。待 App 轉到 Element 1 頁面後，點選 Sensor Server（如圖 24 左二）。待 App 轉到 Sensor Server 頁面後，點選 Bind Application Key（如圖 24 左三）。App 轉到 Bind Application Key 頁面後，點選設置好的 Application Key（App Key 1）再點選 Done，如此就已將該裝置內上層的 Sensor Server model 跟其 Application Key 綁定完成。

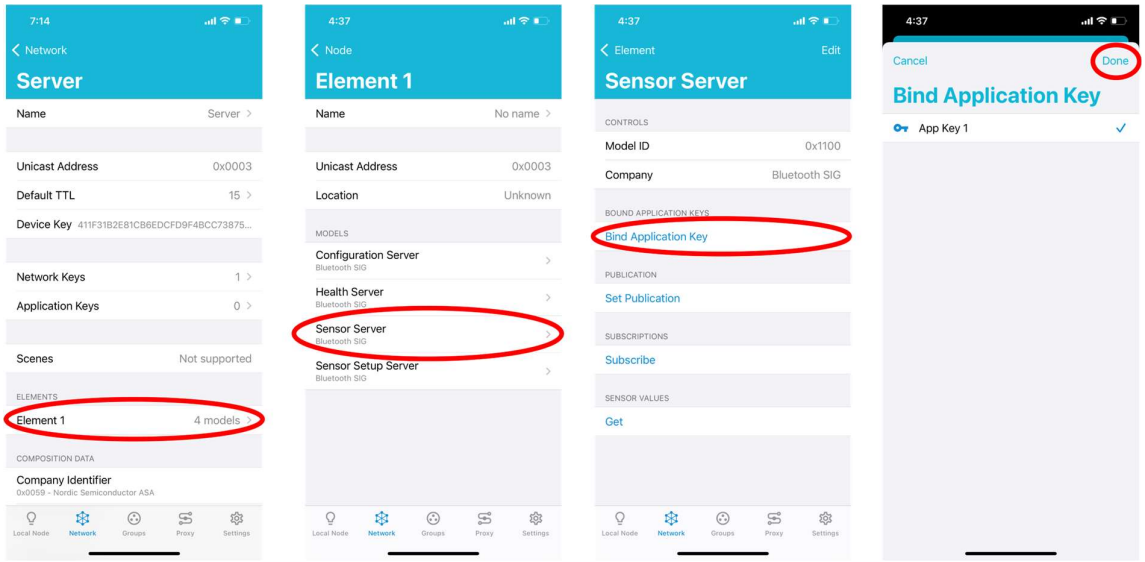


圖 24. 前置設定：將設置好的 Application Key 跟裝置上層特定 model 進行綁定（彭和李，無日期）

接著就可指定 Publish/Subscribe 位址名稱，使各裝置開始可以進行資料收送。這部份流程如下（見圖 25）：延續圖 24 左三，改為點選 Set Publication（如圖 25 左一，注意此例是針對火災偵測節點在設定）。App 轉到 Set Publication 頁面後，點選先前已綁定的 Application Key（App Key 1，如圖 25 左二）。App 轉到 Select key and destination 頁面後，點選先前已新增的 Publish/Subscribe 位址名稱（New Group，如圖 25 左三）。接著點選 Back 返回前一頁面後，再點選右上角的 Done，裝置就開始可以發送資料了。

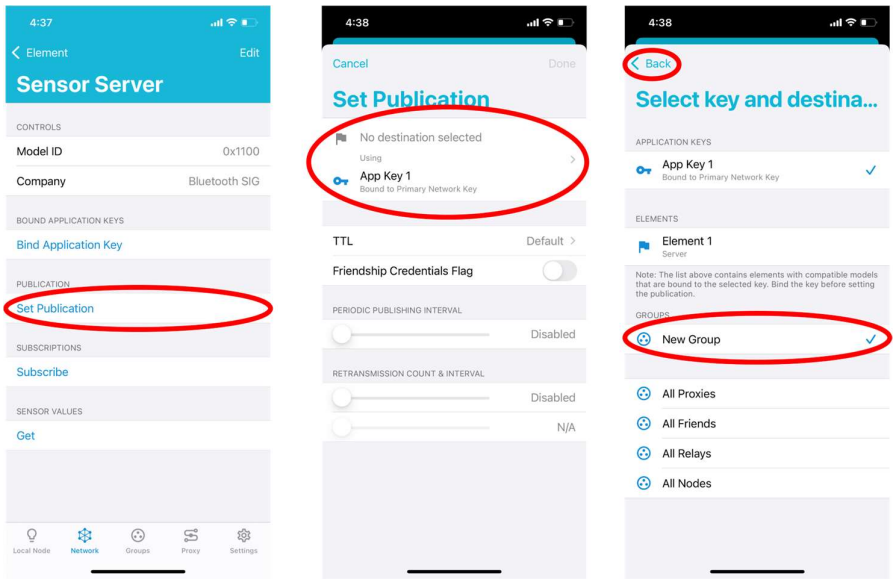


圖 25. 前置設定：使裝置開始可以發送資料－火災偵測節點（彭和李，無日期）

前述設定步驟之介紹主要以火災偵測節點為例，至於火災偵測閘道器（sensor client，感測資料接收者），其設定也與火災偵測節點（sensor server，感測資料提供者）類似，不過乃是改為選取 sensor client 或 client 來進行，此外，在圖 24 和圖 25 的流程中，亦必須改為選取 Element 2（如圖 26 左一）、Sensor Client（如圖 26 左二）及 Subscribe（如圖 26 左三），最後再選取火災偵測應用的 Publish/Subscribe 位址名稱 (New Group)，然後點選 Done（如圖 26 左四），閘道器就開始可從各節點接收資料了。

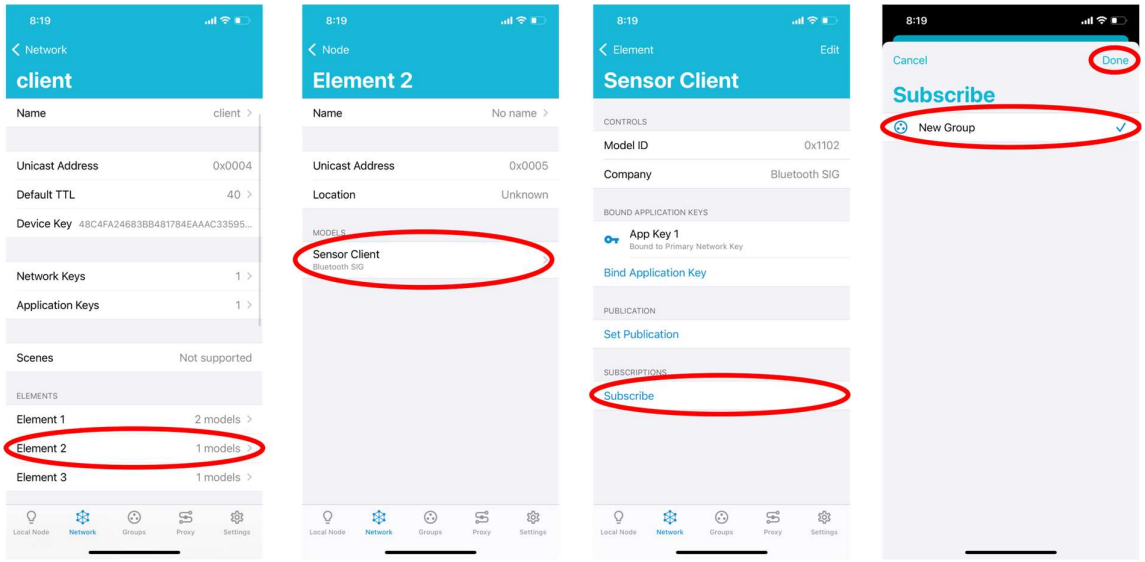


圖 26. 前置設定：使裝置開始可接收資料－火災偵測閘道器（彭和李，無日期）

五、 結論

(一) 結語

本研究目標為「為合作企業的網際網路喇叭(IP Speakers)產品，附加設計實用的應用服務以提升其產品的附加價值」，增加產品的應用面向，進而開啟更廣的市場商機，故為此產品增添價值的具體意義在於：網際網路喇叭是原始的基礎產品，但在市場上同類型產品的競爭對手眾多，若能依據此產品之特性將其導入災害應變相關之物聯網資訊服務，合作企業可以透過此服務開創新型態的商機，打造多角化經營模式，而非僅侷限於販售網際網路喇叭本身，便有機會為產品打開更廣的市場。以此目標為方向，本研究設計出一套適用於火災場景之物聯網災害應變輔助廣播系統，並基於此設計成功實作出系統的雛型，系統測試結果顯示本系統之設計確實可行，且系統雛型亦能正確運作。

具體而言，本研究整合數種物聯網暨網際網路技術，包含微控制器、氣體感測器、

Bluetooth mesh 無線通訊技術及 PoE 等多項元素，進行研究系統的設計與開發。本論文僅就蒙允公開的部份進行成果展現。必須注意的是，本研究系統目的並非取代現有災害應變系統，而是一輔助的角色，依據火災實際起始點及發展趨勢，不斷動態演算並更新各地點當前最佳逃生路徑，並以適地性語音廣播的方式補強靜態指示牌的受限之處，可謂多一分輔助，就多一分助力。

就系統架構暨功能來說，整體系統由三個子系統所組成，分別為火災偵測子系統、中控子系統及廣播子系統。火災偵測子系統（Bluetooth mesh/Ethernet 火災偵測閘道器及多個 Bluetooth mesh 火災偵測節點）負責*火災偵測*並生成火災信號（含節點識別碼）向中控子系統進行*火災通報*；中控子系統（後端伺服器）負責根據節點識別碼、系統逃生拓樸與鏈結成本、火災起始點及發展趨勢，*持續演算當前最佳逃生路徑*並將相應的逃生指引信令佈達給廣播子系統；廣播子系統（多個廣播節點）平時可用於公*共廣播*，一旦接收到逃生指引信令，各廣播節點就會根據個別接收到的指引信令播放相應的*適地性逃生指引語音*。

就系統特色來說，本研究系統採用「上層規格統一」且「可直接用智慧型手機或平板電腦（Bluetooth LE 為標配）對節點及閘道器進行設定」的 Bluetooth mesh 取代（缺乏這兩項優勢的）ZigBee 來組建火災偵測節點及閘道器間的無線感測網路；此外，由火災偵測節點傳送出來的火災信號包括了節點識別碼，而中控子系統則儲存著各節點及逃生出口兩兩之間的通行鏈結資訊，根據這些資訊及火災信號內的節點識別碼，中控子系統便可使用本研究所採納的簡易逃生路徑演算法應對火災起始點和火勢發展狀況，持續動態計算出不同地點的逃生方向，再佐以廣播子系統提供的適地性逃生指引語音廣播，相信可在煙霧瀰漫、視線差的火場裡有效輔助逃生，提升成功機率。

最後，就系統價值而言，火災現行宣導主要以「小火快跑、濃煙關門」為關鍵口訣，然而，當火勢一旦失控蔓延開來時，光靠這些基本常識是遠遠不夠的，尤其是發生在公共場所、而非居家的情境之時。在這種情況下，適切的逃生路線指引就顯得格外重要。本研究所開發的系統，其主要價值正體現在幫助民眾安全而有效地逃離火場的能力上。透過火災偵測子系統、動態路徑演算和適地性語音廣播子系統的緊密結合，本系統能夠：A. 即時感知火情：藉由部署於現場的感測節點，即時監控火勢發展狀況；B. 動態計算最佳路徑：根據火點位置及瞬息萬變的火勢發展趨勢，動態計算出各區域的最佳逃生路線；C. 主動提供當前最佳指引：經由廣播子系統，為各區域提供適地性的語音逃生指引，

讓民眾能跟隨系統指示前往安全出口；D. 輔助傳統消防設施：作為靜態逃生標誌及整體語音廣播等現有設施的有力輔助。綜論之，當火勢蔓延，室內可能瀰漫著濃煙，能見度極低，單靠肉眼根本無法判斷出最安全的逃生路線。在這種環境下，本研究系統無疑能夠提供民眾難能可貴的方向引導，大幅提高逃生的成功率，盡可能避免更多不必要的人命傷亡。因此，本系統的實際應用價值正體現在當環境惡劣、傳統指引設施力有未逮時，能為公共場所中的民眾提供即時且試地性的語音逃生指引，讓民眾有更大機會安全脫困，保全性命。

(二) 未來方向

現階段本研究系統各廣播節點乃採用有線供電及通訊的 PoE 技術，若線路或 PoE Switch 遭燒毀又或是類似錢櫃大火案消防設施電源竟遭關閉，將直接影響系統的有效運作，因此，未來考慮全面改用 Bluetooth mesh 通訊進行資料傳輸，並加入電池供電作為輔助，這樣，當線路或 PoE Switch 遭焚毀又或是消防設施電源遭關閉時，節點可即時切換至電池供電，保持容錯運作，延長系統有效運作的時間。此外，現階段本研究系統採納的逃生路徑演算法較為簡易，未來可設計更優化的逃生路徑演算法以及將更多因子納入通行鏈結成本的計算（例如擴充系統得以偵測到人流移動速度及密度的動態變化並據以動態更新通行鏈結成本），進一步提升逃生成功的機率。不僅如此，未來可行的系統擴充方案亦包含跟既有的緊急照明系統整合，也可透過民生示警公開資料平台獲得地震等多重警示資料，以提供更多類型的災害應變動態逃生語音指引，這樣的整合將進一步擴充系統的災害應變能力，使其能應對更廣泛的災害種類，保障人們有更大機會安全逃生。

誌謝

本研究感謝國科會產學合作研究計畫(NSTC 109-2622-E-159-004、NSTC 108-2622-E-159-002-CC3)、國科會大專學生研究計畫(NSTC 109-2813-C-159-004-E)、國科會鼓勵女性從事科學及技術研究專案計畫(NSTC 109-2635-E-159-002)和志豐電子股份有限公司所提供的經費補助。

參考文獻

1. 中華民國行政院（民 105）。亞洲・矽谷推動方案，第一段。取自

https://www.ey.gov.tw/Page/5A8A0CB5B41DA11E/061a86af-c228-4af0-91ff-ae33c193ecb8 （擷取日期：民 113 年 3 月 18 日）

2. 中華民國國家發展委員會（無日期）。5+2 產業創新計畫，第一段。取自 https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=9D024A4424DC36B9（擷取日期:民 113 年 3 月 18 日）
3. 志豐電子（無日期）。取自 https://www.kingstate.com.tw/ （擷取日期：民 113 年 3 月 15 日）
4. 林偉信、粘耿豪（民 112）。錢櫃大火 6 死慘劇 火調專家作證驚爆「消防設備全失靈」！取自 https://www.chinatimes.com/realtimenews/20231129003062-260402?chdtv （擷取日期：民 113 年 3 月 11 日）
5. 孫曜樟、王聖光（民 109）。【全文】5 大安全設備關閉逾 5 個月 錢櫃 KTV 火災慘劇 肇因人禍。取自 https://tw.news.yahoo.com/%E5%85%A8%E6%96%87-5%E5%A4%A7%E5%AE%89%E5%85%A8%E8%A8%AD%E5%82%99%E9%97%9C%E9%96%89%E9%80%BE5%E5%80%8B%E6%9C%88-%E9%8C%A2%E6%AB%83ktv%E7%81%AB%E7%81%BD%E6%85%98%E5%8A%87%E8%82%87%E5%9B%A0%E4%BA%BA%E7%A6%8D-215859045.html?guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAABFD0i0wWKVPedqdBsPrlSylI4QDzzJdoAWjrMBc0ml8huoa60Gbjzb7-aiYZrl0CVc4ERuGeSRAp1ef5sw-TmjEhwabZI8E1l_MuOtkKMnW5InRAIBHoiujILUINKwVh2fL-JRxHex1QZFyS5w_rGxHxmgV3hqA0u0PMeT2Yoco （擷取日期：民 113 年 3 月 6 日）
6. 高峰公職（民 109）。【重點整理】台北市林森北路錢櫃 KTV 火災報告。取自 https://www.kao-feng.com/news/ktv （擷取日期：民 113 年 3 月 11 日）
7. 彭亦暄、田振岡、李佩君（民 111）。Bluetooth Mesh 智慧型災害應變輔助廣播系統. 於 **2022 臺灣網際網路研討會論文集**（頁 111-116）。
8. 彭亦暄、李佩君（無日期）。物聯網之災害應變輔助廣播系統。取自 https://www.grb.gov.tw/search/planDetail?id=13609994 （擷取日期：民 113 年 3 月 15 日）
9. 彭亦暄、李佩君、田振岡、鄭宗棋（民 110）。智慧型災害應變廣播系統的設計與實作。於 **2021 臺灣網際網路研討會論文集**（頁 1904-1908）。
10. 游坤明、鄭紹材、連振昌、李慶霖、徐煥博（民 104）。智慧型避難引導結合廣播及標示系統之研究。中華大學，科技部 GRB 編號：PG10402-0046。
11. 瑞德感知（無日期）。動態導引號誌詳細規格。取自 https://www.hexsave.com/spec-ads.html （擷取日期：民 113 年 3 月 15 日）
12. Barnes, M., Leather, H., & Arvind, D. K. (2007). Emergency Evacuation using Wireless Sensor Networks. In *32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007)*

(pp. 851-857). doi: 10.1109/LCN.2007.48.

13. Bluetooth SIG, Inc. (2019). *Bluetooth Specification - Mesh Model Specification 1.0.1*, Jan. 21. Retrieved from https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=457091 (Access date: 2024/3/15)
14. Bluetooth SIG, Inc. (2019). *Bluetooth Specification - Mesh Profile Specification 1.0.1.* Retrieved from https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=457092 (Access date: 2024/3/15)
15. Bluetooth SIG, Inc. (n.d.). Build a Smarter Building with Blue. Retrieved from https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/smartbuilding-infographic/?utm_campaign=smart-building&utm_source=internal&utm_medium=blog&utm_content=introducing-bluetooth-mesh-networking (Access date: 2024/3/15)
16. Bluetooth SIG, Inc. (n.d.). DEVELOP WITH BLUETOOTH - Qualify Your Product. Bluetooth. Retrieved from https://www.bluetooth.com/develop-with-bluetooth/qualification-listing/ (Access date: 2024/3/15)
17. Bluetooth SIG, Inc. (n.d.). LEARN ABOUT BLUETOOTH - Bluetooth mesh networking FAQs. Retrieved from https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/feature-enhancements/mesh/mesh-faq/ (Access date: 2024/3/15)
18. Bluetooth SIG, Inc. (n.d.). SPECIFICATIONS - Specifications and Documents. Retrieved from https://www.bluetooth.com/specifications/specs/ (Access date: 2024/3/15)
19. Chen, S. H., Lin, X. M., & Wu, Z. Y. (2019). Intelligent disaster prevention and escape method and system. United States Patent US 10322302 B2 Patent Appl. 15/509862. Retrieved from https://patents.google.com/patent/US10322302B2/en (Access date: 2024/3/15)
20. Davidson, R., Akiba, C., Cufi, C., & Townsend, K. (2014). *Getting Started with Bluetooth Low Energy*. O'Reilly Media, Inc.
21. Depari, A., Flammini, A., Fogli, D., & Magrino, P. (2018). Indoor Localization for Evacuation Management in Emergency Scenarios. In *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT* (pp. 146-150). doi: 10.1109/METROI4.2018.8428343.
22. Jiang, H. (2019). Mobile Fire Evacuation System for Large Public Buildings Based on Artificial Intelligence and IoT. *IEEE Access*, 7, 64101-64109. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2915241.
23. Kelly, C. (2020). MESH NETWORK ENABLED BUILDING SAFETY SYSTEM AND METHOD. United States Patent Appl. 20200193801. Retrieved from http://www.freepatentsonline.com/y2020/0193801.html (Access date: 2024/3/15)

24. Khan, A., Aesha, A. A., Aka, J. S., Rahman, S. M. F., & Rahman, M. J. (2018). An IoT Based Intelligent Fire Evacuation System. In *2018 21st International Conference of Computer and Information Technology (ICCIT)* (pp. 1-6). doi: 10.1109/ICCITECHN.2018.8631945.
25. Kolderup, K. (2017). Introducing Bluetooth Mesh Networking. Retrieved from https://www.bluetooth.com/blog/introducing-bluetooth-mesh-networking/ (Access date: 2024/3/15)
26. Lee, J., Koo, D., Tadesse, D., Jain, A., Shettar, S., & Kim, D. (2020). Emergency Evacuation Assistance. In *2020 14th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)* (pp. 1-6). doi: 10.1109/IMCOM48794.2020.9001735.
27. Lester, P. (2005). A* Pathfinding for Beginners. Retrieved from https://www.gamedev.net/reference/articles/article2003.asp (Access date: 2024/3/15)
28. Petrichenko, M. (n.d.). BLUETOOTH FRAMEWORK AND BLUETOOTH LE GATT PROFILE. Retrieved from https://www.btframework.com/gatt.htm (Access date: 2024/3/15)
29. Skillermark, P., & Marco, P. D. (2017). Bluetooth scope widens mesh specification. Ericsson. Retrieved from https://www.ericsson.com/en/blog/2017/7/bluetooth-scope-widens-mesh-specification (Access date: 2024/3/15)
30. Tosi, J., Taffoni, F., Santacatterina, M., Sannino, R., & Formica, D. (2017). Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review. *Sensors*, 17(12), 2898. doi: 10.3390/s17122898.
31. Townsend, K. (2022). *Introduction to Bluetooth Low Energy*. Retrieved from https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/introduction-to-bluetooth-low-energy.pdf (Access date: 2024/3/15)
32. Wang, W., et al. (2019). Dijkstra Algorithm Based Building Evacuation Recognition Computing and IoT System Design and Implementation. In *2019 IEEE 13th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID)* (pp. 229-233). doi: 10.1109/ICASID.2019.8925068.
33. Woolley, M. (2019). Defining Bluetooth Mesh Models. Retrieved from https://www.bluetooth.com/blog/defining-bluetooth-mesh-models/ (Access date: 2024/3/15)
34. Woolley, M. (2020). *Bluetooth Mesh Networking 1.0.1 - an Introduction for Developers*. Retrieved from https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/03/Mesh-Technology-Overview.pdf (Access date: 2024/3/15)
35. Zavin, A., Anzum, F., Rahman, S. M. F., Islam, M. N., & Hoque, M. (2018). Towards Developing an Intelligent Fire Exit Guidance System Using Informed Search Technique.

In *2018 21st International Conference of Computer and Information Technology (ICCIT)* (pp. 1-6). doi: 10.1109/ICCITECHN.2018.8631910.

36. Zhou, M., Dong, H., Ioannou, P. A., Zhao, Y., & Wang, F. (2019). Guided crowd evacuation: approaches and challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 6(5), 1081-1094. doi: 10.1109/JAS.2019.1911672.
37. Zualkernan, I. A., Aloul, F. A., Sakkia, V., Noman, H. A., Sowdagar, S., & Hammadi, O. A. (2019). An IoT-based Emergency Evacuation System. In *2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS)* (pp. 62-66). doi: 10.1109/IoTaIS47347.2019.8980381.